

О. С. Яндульський, д. т. н., проф.; О. В. Тимохін; А. О. Тимохіна

## ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОБОТИ АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ

Стаття присвячена питанню підвищення ефективності роботи системи автоматичного частотного розвантаження (АЧР) за рахунок введення додаткових алгоритмів функціонування, які ґрунтуються на аналізі фазних кутів напруг, які отримують від системи моніторингу перехідних режимів (СМІР).

**Ключові слова:** автоматичне частотне розвантаження, електроенергетична система, системи моніторингу перехідних режимів, дефіцитна енергосистема.

### Вступ

Дефіцитна енергосистема – це система, у якій потужність споживання більша за потужність генерації, тому підтримання балансу споживання та генерації в таких енергосистемах є актуальним завданням. Прикладом такої енергосистеми (ЕС) може слугувати ЕС Криму у разі відключення її від ОЕС України. Як відомо, для усунення порушення балансу між генерацією та споживанням в ЕС призначено засоби протиаварійної автоматики, до яких належать системи автоматичного частотного розвантаження (АЧР), які набувають особливої ролі саме в дефіцитних енергосистемах. Відомо, що системи АЧР спрацьовують за умов зниження частоти до уставки спрацювання АЧР, і після їх спрацювання виникає необхідність у відновленні частоти в ЕС [1 – 3], тому **метою цієї роботи** є пришвидшення швидкодії АЧР, що зменшить негативний вплив небалансу потужностей на роботу ЕС.

### Розробка методу підвищення швидкодії АЧР

Дослідження проведено на 14-вузловій тестовій схемі IEEE, представлений на рис. 1, у програмному комплексі DigsilentPowerFactory.

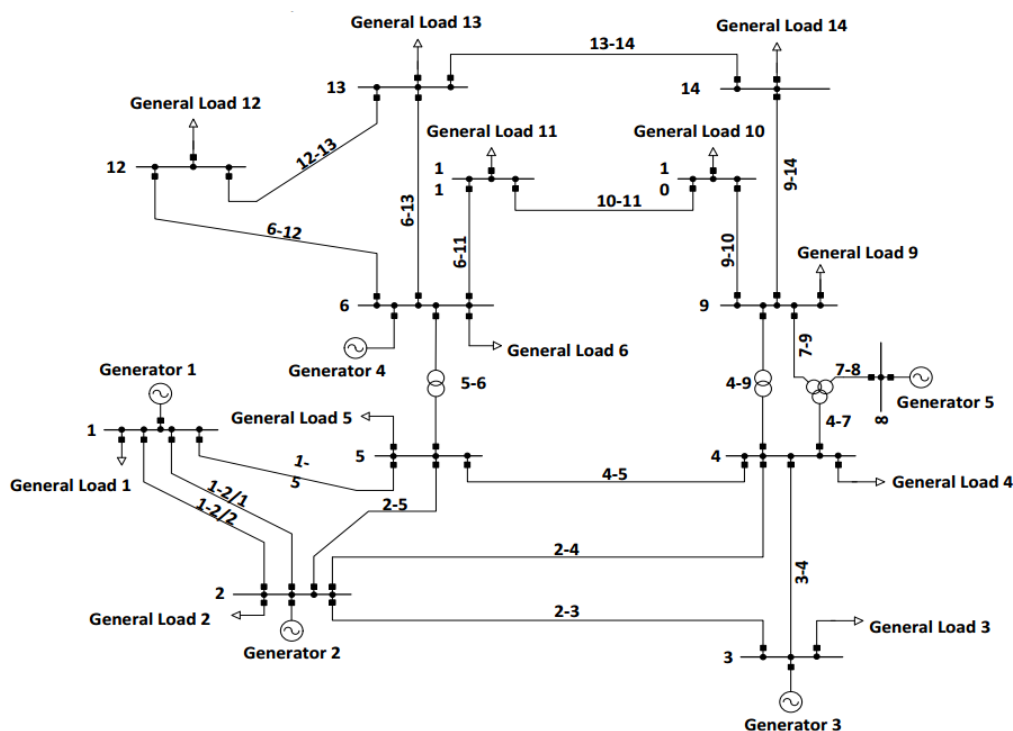


Рис. 1. Дослідна схема електромережі

Дослідження проводили для різних варіантів аварійних ситуацій, наведених в табл. 1. Тривалість короткого замикання (КЗ) для мереж напругою 110, 220 кВ – 140 мс, що складається з максимального часу спрацювання релейного захисту і часу спрацювання вимикача.

Таблиця 1

## Варіанти сценаріїв аварійних ситуацій

Елемент схеми	Пошкодження
ЛЕП 2-4	1-фазне КЗ фази А з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс
	2-фазне КЗ фаз АВ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс
ЛЕП 2-3	3-фазне КЗ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс
	Вимкнення лінії
ЛЕП 4-5	2-фазне КЗ фаз АВ з подальшим вимкненням КЗ через 140 мс
Трансформатор 4-9	Вимкнення трансформатора
Навантаження 1	Вимкнення навантаження
	Накид навантаження
Генератор Г1	Вимкнення генератора
Генератор Г2	Вимкнення генератора

Проведені дослідження (рис. 2, 3) показали залежність між виникненням збурювального впливу в ЕС та швидкістю зміни кута напруги у вузлах ЕС. У разі вимкнення/накиду навантаження або вимкнення генератора частота змінюється монотонно. При цьому зміна частоти за 1 с складає 0,012%, а зміна кута – 20%, тобто зміна частоти є значно повільнішою. Отже, використання зміни кута напруги для оцінки режимів електроенергетичної системи дозволяє швидше відреагувати на аварію в мережі, особливо в перші 2 с після початку аварії, що є основою для створення більш швидкодіючої системи ПА.

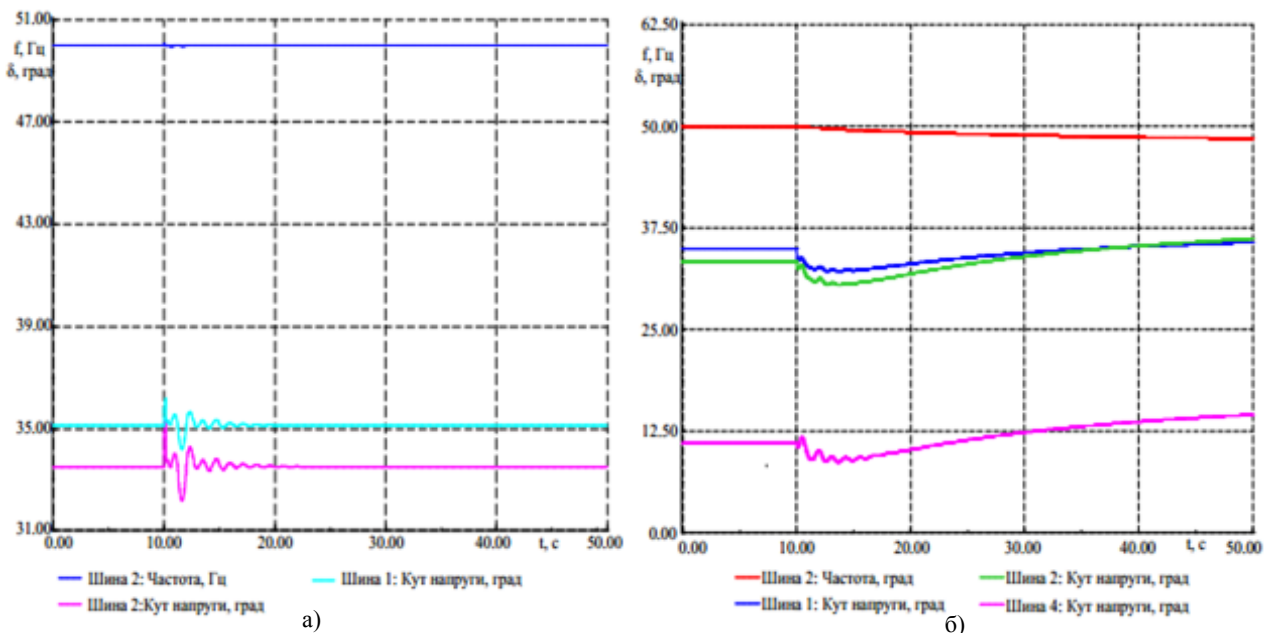


Рис. 2. Залежності зміни частоти та кута напруги від часу за різних варіантів аварійних ситуацій: а) 2-фазне КЗ (фази а, б) на ЛЕП 2-4, б) накид навантаження на GeneralLoad1

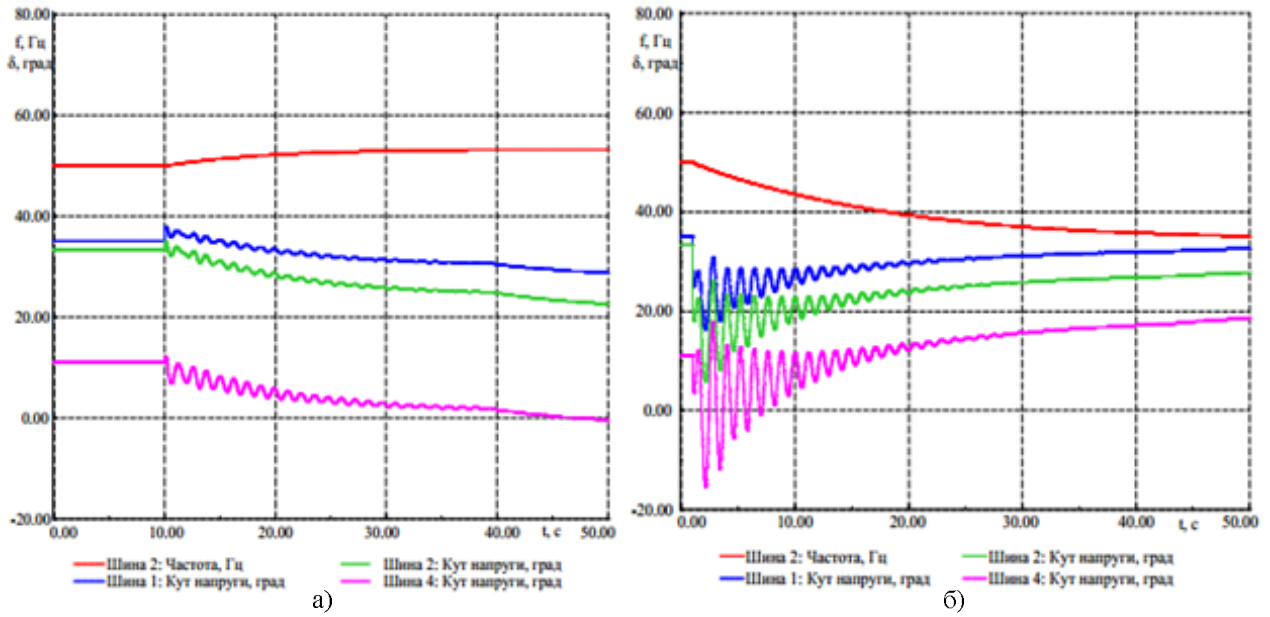


Рис. 3. Залежності зміни частоти та кута напруги від часу за різних варіантів аварійних ситуацій: а) вимкнення навантаження на General Load1, б) вимкнення генератора G2

У якості показника зміни кута напруги було обрано швидкість зміни кута. Результати дослідження наведені на рис. 4. Як видно з отриманих залежностей, у разі виникнення аварії швидкість зміни кута досягає свого максимуму за модулем. У випадку КЗ з'являється 2 піки: один в момент виникнення, другий у момент вимкнення КЗ пристроями РЗ.

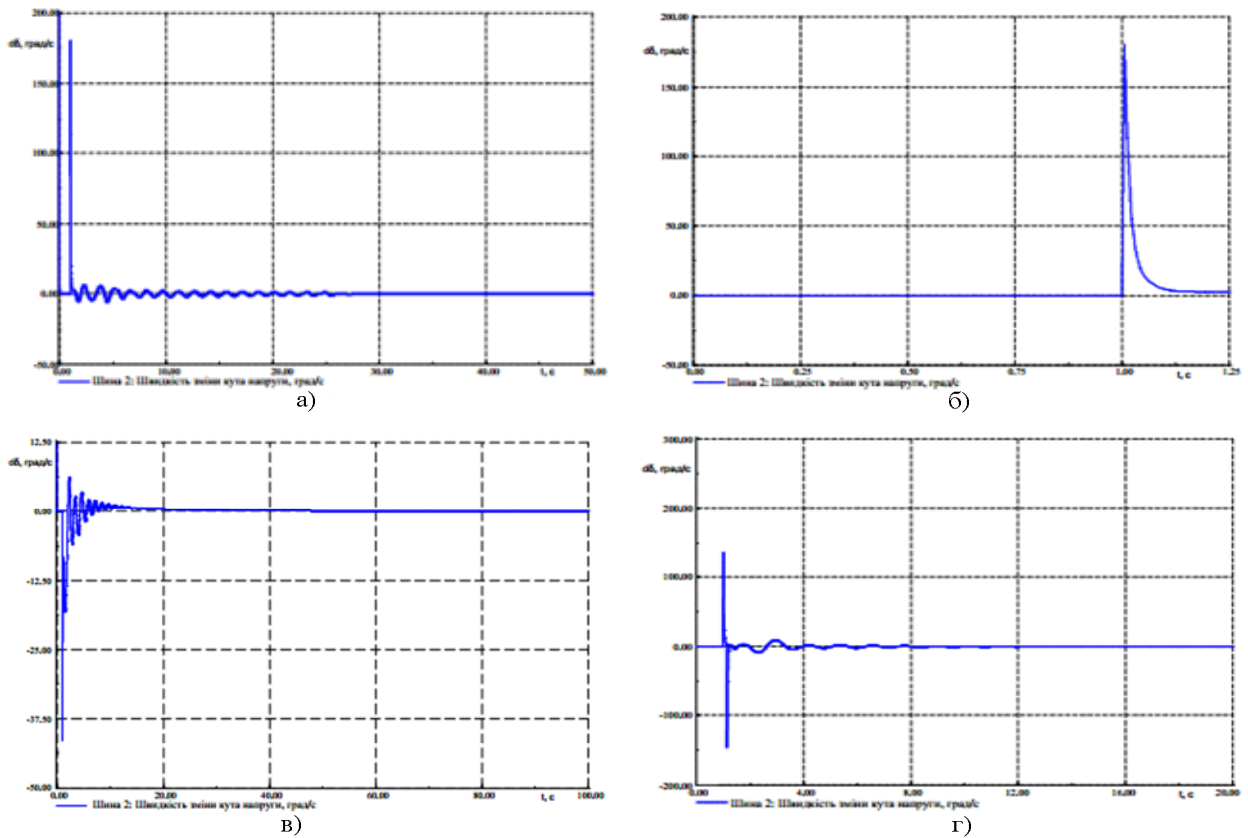


Рис. 4. Залежності зміни швидкості зміни кута напруги від часу: а) вимкнення ЛЕП 2-3 у момент  $t=1$  с, б) збільшена частина залежності швидкості зміни кута напруги від часу під час вимкнення ЛЕП 2-3 у момент  $t=1$  с, в) накид навантаження на шині 3 у момент  $t=1$  с, г) 2-фазне КЗ на ЛЕП 2-4 у момент  $t=1$  с

Отримані властивості було використано під час розробки алгоритму роботи вдосконаленої АЧР-1, алгоритм якої представлено на рис. 5. Удосконалена АЧР-1 містить додатковий блок, що реагує на швидкість зміни кута напруги [4].

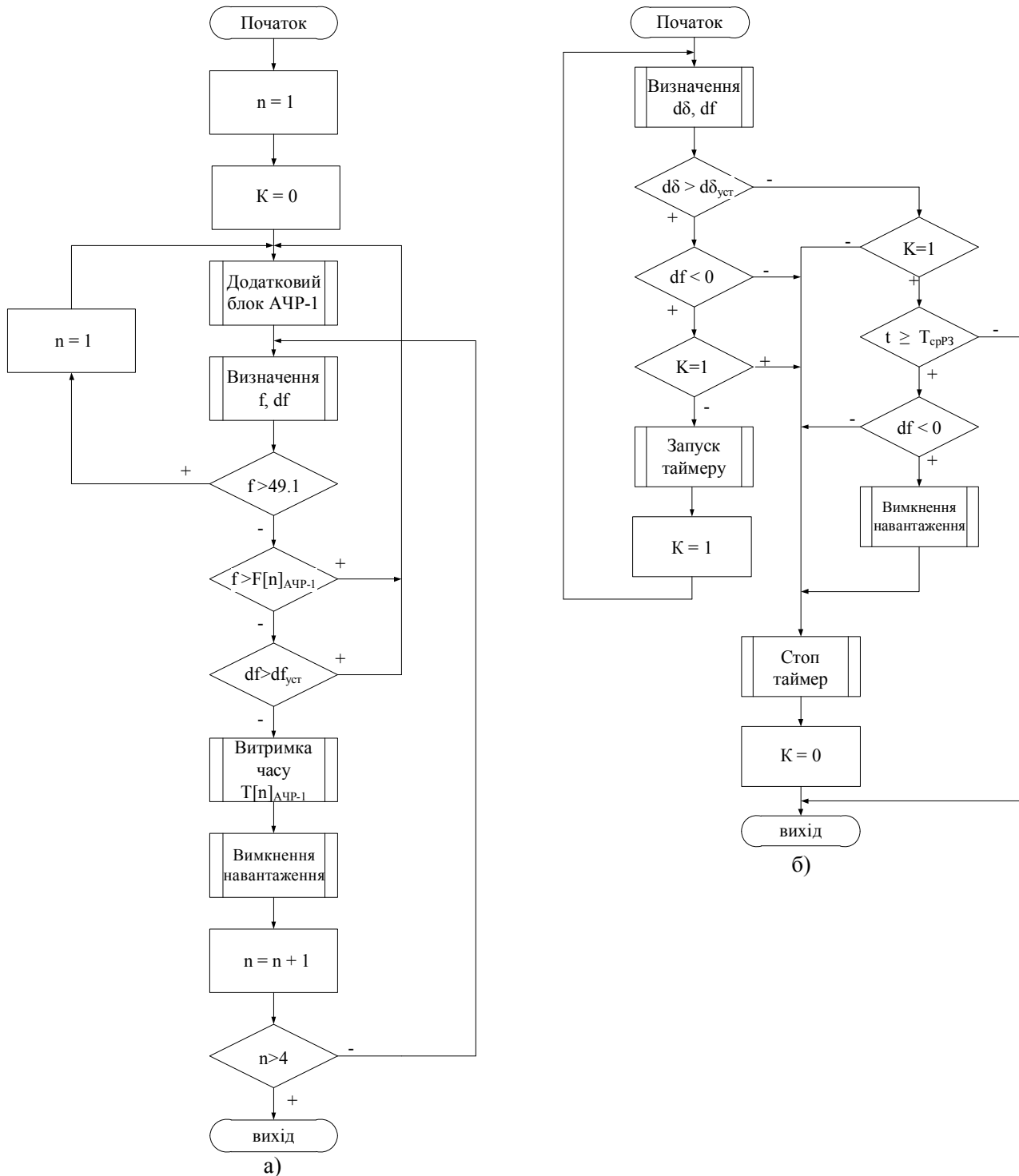


Рис. 5. Блок-схема алгоритму:

- а) АЧР-1 з використанням залежності зміни кута напруги від часу,
- б) додаткового блоку АЧР-1 з використанням залежності зміни кута напруги від часу

На основі алгоритму роботи вдосконаленої АЧР-1 було розроблено модель блоку, що реагує на швидкість кута напруги (рис. 6). У якості моделі наявної АЧР було використано модель чотириступеневої АЧР з бібліотеки Power Factory. Водночас на дослідній 14-вузловій тестовій схемі IEEE було встановлено додаткові шини напругою 10 кВ для подальшого під'єднання до них пристроїв АЧР.

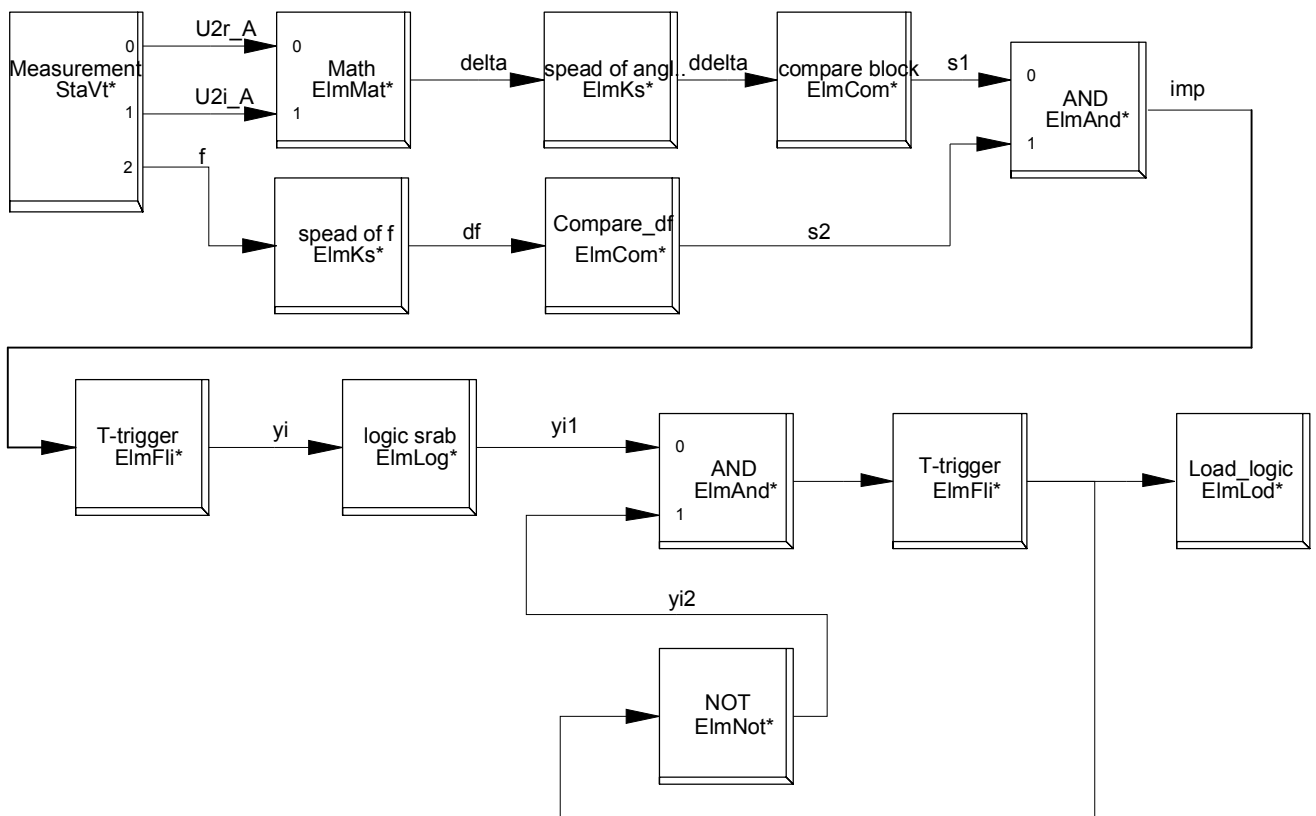


Рис. 6. Модель блоку, що реагує на швидкість зміни кута напруги

У моделі використовують такі блоки:

1. *Measurement* – блок, що являє собою ТН, на виході якого отримують значення напруги фази А (активний і реактивний складники), а також значення частоти.

2. *Math* – блок обчислення. У цьому блоці відбувається обчислення значення кута напруги.

3. *Speed of angle* – блок розрахунку швидкості зміни кута напруги.

4. *Compareblock* – блок порівняння. Якщо швидкість зміни кута більша за уставку, то на виході формується логічна одиниця.

5. *Speedoff* – блок розрахунку швидкості зміни частоти.

6. *Compare df* – блок порівняння. Якщо знак швидкості зміни частоти від’ємний, то на виході формується логічна одиниця, у разі додатного знаку швидкості зміни частоти формується логічний нуль.

7. Блок *AND* забезпечує спрацювання додаткового блоку АЧР-1 лише у випадках, що призводять до зниження частоти.

8. *T-trigger* – блок, що складається з двотактного Т-тригера. Цей блок забезпечує фіксацію появи сигналу накиду навантаження.

9. *Logicsrab* – логіка спрацювання. Цей блок виконує функцію перевірки характеру аварії: у разі КЗ на виході цього блоку буде логічний нуль, а за накиду навантаження – логічна одиниця.

10. Інші три блоки *NOT*, *AND*, *T-trigger* використовують для фіксації сигналу накиду навантаження.

11. *Load\_logic* – блок вимкнення вимикача. Коли на вхід цього блоку приходить логічна одиниця, то відбувається вимкнення навантаження на шині.

Результати моделювання роботи вдосконаленої АЧР-1 (табл. 2, рис. 7) показали, що АЧР на основі розробленого методу є більш швидкодіюною за рахунок виявлення аварії в перші мілісекунди після її появи та запуску додаткового блоку АЧР-1, унаслідок чого зменшується

швидкість або припиняється зниження частоти.

Отримані результати є основою для подальших досліджень АЧР-1 та розробки [5, 6]: адаптивної системи, що розраховує величину небалансу потужності; методики щодо вибору уставок спрацювання; методики визначення місць відключення навантаження; дослідження роботи енергомережі в складних аваріях та взаємодія вдосконаленої АЧР-1 з роботою іншої автоматики ЕС.

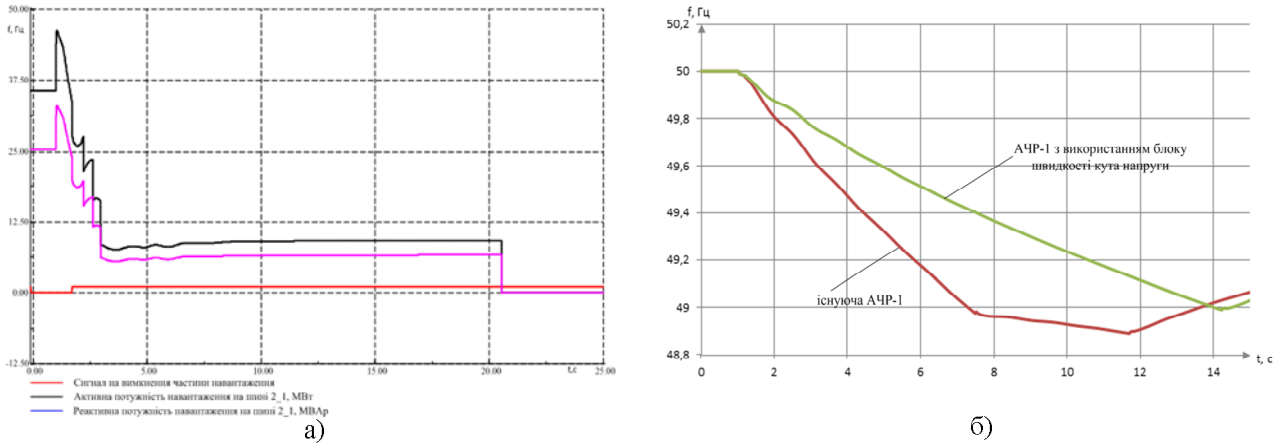


Рис. 7. а) Вимкнення частини навантаження й подальшої роботи АЧР-1 під час вимкнення генератора G2, б) Робота наявної системи АЧР-1 та АЧР-1 із використанням блоку швидкості зміни кута напруги в разі накиду навантаження на шині 3 на величину (70,65+j5,7) МВА

Таблиця 2

Таблиця зміни частоти

Вид пошкодження	$f_{t=100с}$ , Гц без АЧР	$f_{t=100с}$ , Гц з АЧР	$f_{t=100с}$ , Гц вдосконалена АЧР	Величина накиду навантаження		Час досягнення уставки спрацювання АЧР, с	
				P, МВт	Q, МВАр	Наявна АЧР	Удосконалена АЧР
Накид навантаження на 3 шині	46,566	49,919	49,832	42,3	2,85	11,62	0,1611
Накид навантаження на 1 шині	46,506	49,941	49,910	50	15	12,85	0,1546
Накид навантаження на 3 шині	43,446	49,934	49,734	70,65	5,7	7	0,1561
Вимкнення генератора G2	9,507	49,538	50	–	–	1	0,704
2-фазне КЗ на ЛЕП 2-4	$f_{min}=49.828$	$f_{min}=49.828$	$f_{min}=49.828$	–	–	–	–

**Висновки**

1. Результати моделювання показали, що АЧР на основі розробленого методу є більш швидкодіюною за рахунок виявлення аварії в перші мілісекунди після її появи та запуску додаткового блоку АЧР-1, унаслідок чого зменшується швидкість або припиняється зниження частоти.

2. Отримані результати є основою для подальших досліджень АЧР-1 та розробки:
- адаптивної системи, що розраховує величину небалансу потужності;
  - методики щодо вибору уставок спрацювання;
  - методики визначення місць вимкнення навантаження;

– досліджень роботи енергомережі у складних аваріях та взаємодії вдосконаленої АЧР-1 з роботою іншої автоматики ЕС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Совалов С. А. Противоаварийное управление в энергосистемах / С. А. Совалов, В. А. Семенов. – М. : Энергоиздат, 1988. – 416 с.
2. Рабинович Р. С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем / Рабинович Р. С. – [2-е изд.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Голота А. Д. Автоматика в електроенергетичних системах / Голота А. Д. – К. : Вища школа, 2006. – 365 с.
4. Mohd Zin A. A. Static and Dynamic Under-frequency Load Shedding: A Comparison / A. A. Mohd Zin, H. Mohd Hafiz, W. K. Wong // International Conference on Power System Technology, POWERCON, Singapore. – 21 – 24 November 2004. – P. 941 – 945.
5. Bai D. Under frequency load shedding scheme based on information sharing Technology / D. Bai, J. He, X. Yang, B. Kirby, D. Writer, L. Liu // CIRED: 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm. – 10 – 13 June 2013. – P. 1 – 4.
6. Bevrani H. Power system load shedding: Key issues and new perspectives / H. Bevrani, A. G. Tikdari, T. Hiyama // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2010. – № 65. – P. 177 – 182.

**Яндульський Олександр Станіславович** – д. т. н., проф., декан факультету електротехніки та автоматики, вул. e-mail: yandu\_kpi@ukr.net, тел.: (044) 236-41-11.

**Тимохін Олександр Вікторович** – ст. викладач кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: tymokhin@ukr.net.

**Тимохіна Анастасія Олександрівна** – аспірант, асистент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: a.planida@ukr.net, тел.: (044) 406-86-14.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».